



# 古建筑压煤开采对斜坡上覆堆积层变形扰动影响研究

安成纪 龙建辉 胡海峰 李旭鹏 李美平 李娟

## 引用本文：

安成纪, 龙建辉, 胡海峰, 等. 古建筑压煤开采对斜坡上覆堆积层变形扰动影响研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(10): 169–180.

AN Chengji, LONG Jianhui, HU Haifeng. Study on influence of coal mining under ancient building on deformation disturbance of overlying accumulation layer on slope[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(10): 169–180.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1395>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 巨厚含水松散层下开采地表移动变形规律研究

Study on surface movement and deformation laws in mining under thick water-bearing loose layer

煤炭科学技术. 2022, 50(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/bea4b523-85f5-4b5b-86f6-2e1628a8bc29>

#### 矿区地表与建(构)筑物移动变形关系实测研究

In-situ monitoring study on relationship between movement and deformation of surface and buildings in mining area

煤炭科学技术. 2020, 48(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/d5d247ee-c816-46ee-8415-859b96fad421>

#### 基于物理模拟试验的房柱式采空区变形特征研究

Study on deformation characteristics of room-and-pillar mined-out area based on physical simulation test

煤炭科学技术. 2024, 52(S1): 30–36 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0554>

#### 上覆遗留区段煤柱对下伏煤层开采的扰动影响研究

Study on disturbing influence of overlying remaining coal pillars on underlying coal seam mining

煤炭科学技术. 2020, 48(3) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/9a1740d2-5a23-4e99-a696-41d5dfc59e5c>

#### 厚松散层薄基岩下开采地表变形规律—以鲁南矿区为例

Surface deformation law of mining under thick loose layer and thin bedrock: taking the southern Shandong Mining Area as an example

煤炭科学技术. 2023, 51(9): 11–23 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1451>

#### 高速公路下伏采空区安全深度的数值模拟研究

Study on numerical simulation of safety depth of goaf under expressway

煤炭科学技术. 2021, 49(10): 193–200 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/cb99fad4-eef7-4725-aa3c-d1162cb3db16>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

安成纪,龙建辉,胡海峰,等.古建筑压煤开采对斜坡上覆堆积层变形扰动影响研究[J].煤炭科学技术,2024,52(10):169-180.

AN Chengji, LONG Jianhui, HU Haifeng, et al. Study on influence of coal mining under ancient building on deformation disturbance of overlying accumulation layer on slope[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(10): 169-180.

## 古建筑压煤开采对斜坡上覆堆积层变形扰动影响研究

安成纪<sup>1,2</sup>,龙建辉<sup>1</sup>,胡海峰<sup>1</sup>,李旭鹏<sup>3</sup>,李美平<sup>4</sup>,李娟<sup>1</sup>

(1.太原理工大学 地球科学与测绘工程学院,山西 太原 030024;2.中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司,陕西 西安 710065;

3.山西省交通新技术发展有限公司,山西 太原 030006;4.山西冶金岩土工程勘察有限公司,山西 太原 030032)

**摘要:**针对缓倾顺层斜坡上覆堆积层的采动稳定性与变形机理的研究,特别是从协调地下资源开采与地上文物古建筑安全防护视角出发的研究处在探索阶段。以山西省宝应寺斜坡堆积层为研究对象,基于地表动态监测与地质过程机制分析,结合数值模拟研究了堆积层稳定性与地表裂缝成因机制,并探讨优化了开采方式。研究表明:①长壁式地下开采是引起堆积层变形的诱因,堆积层软弱特性与斜坡软硬互层结构是其变形内因。堆积层下伏基岩变形模式为垂向挤压水平拉张,对堆积层变形具有放大效果,牵动其产生地裂缝。堆积层变形破坏机制为:坡下采空—覆岩弯曲—侧岩倾倒变形—下伏岩层应力集中—牵动拉裂;②堆积层裂缝分布在上坡方向采空区工作面端部附近,平面上近似平行,呈“之”字或锯齿状。地物裂缝较之地表裂缝数量更多、但规模更小,寺院建筑群受隐伏张性地裂缝影响致地基形变造成地面以上结构开裂;停采后监测期内,堆积体变形速率趋于收敛,残余变形消减,由变形移动转为基本稳定;③完全采空后,堆积层表现为以下错为主的拉张变形,剪应力显现,持续开采条件下堆积层变形程度将加剧。下伏基岩最大主应力增量达1080.75%,拉应力集中;④短壁房式开采留设区段煤柱利于减小堆积层变形。研究为认识地下资源开采扰动斜坡上覆堆积层变形破坏与寻求古建筑压煤开采文物保护解决方案提供了参考。

**关键词:**建筑物下压煤;采空区;顺层斜坡;堆积层;变形监测

**中图分类号:**TD325   **文献标志码:**A   **文章编号:**0253-2336(2024)10-0169-12

### Study on influence of coal mining under ancient building on deformation disturbance of overlying accumulation layer on slope

AN Chengji<sup>1,2</sup>, LONG Jianhui<sup>1</sup>, HU Haifeng<sup>1</sup>, LI Xupeng<sup>3</sup>, LI Meiping<sup>4</sup>, LI Juan<sup>1</sup>

(1. College of Earth Science and Surveying Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Northwest Engineering Co., Ltd., Power China, Xi'an 710065, China; 3. Shanxi Transportation New Technology Development Co., Ltd., Taiyuan 030006, China; 4. Shanxi Metallurgical Geotechnical Engineering Investigation Co., Ltd., Taiyuan 030032, China)

**Abstract:** The research on the mining stability and deformation mechanism of the overlying accumulation layer on the gently inclined bedding slope, especially from the perspective of coordinating the exploitation of underground resources and the safety protection of ancient buildings on the ground is in the exploratory stage. Taking the accumulation layer of Baoyingsi slope in Shanxi Province as the research object, based on the analysis of surface dynamic monitoring and geological process mechanism, combined with numerical simulation, the stability of accumulation layer and the formation mechanism of surface cracks were studied, and the mining method was discussed and optimized. The research shows that: ① Long-wall underground mining is the cause of the deformation of the accumulation layer, and the weak characteristics of the accumulation layer and the soft and hard interbedded structure of the slope are the internal causes of its deformation. The deformation mode of the bedrock under the accumulation layer is vertical extrusion and horizontal tension, which has an amplifying effect on the accumulation layer deformation; ② The accumulation layer cracks are distributed near the end of the working face of the upper slope in the mining area, showing a zigzag or serrated shape. The ground surface cracks are more numerous than the surface cracks but smaller in scale, and the temple complex is affected by hidden extensional fractures causing ground surface structure cracking; during the monitoring period after mining, the deformation rate of the accumulation body tends to converge, and the residual deformation is reduced, changing from deformation movement to basic stability; ③ After the accumulation layer is completely exhausted, it shows a错为主的 extensional deformation, and the shear stress appears, and the deformation degree of the accumulation layer will increase under continuous mining conditions. The maximum principal stress increment of the underlying rock mass is 1080.75%, and the tensile stress is concentrated; ④ Short-wall room-and-pillar mining and leaving pillars in the mining area can reduce the deformation of the accumulation layer. This study provides a reference for understanding the impact of underground resource extraction on the slope deformation of the overlying accumulation layer and seeking solutions for protecting ancient buildings under coal mining.

收稿日期:2023-10-02   策划编辑:常琛   责任编辑:宫在芹   DOI: 10.12438/cst.2023-1395

基金项目:山西省自然科学基金资助项目(202103021224112)

作者简介:安成纪(1999—),男,甘肃陇南人,硕士研究生。E-mail: acjflame@163.com

通讯作者:龙建辉(1972—),男,湖南益阳人,副教授,博士。E-mail: longjianhei@163.com

fication effect on the deformation of the accumulation layer and affects the generation of ground cracks. The deformation and failure mechanism of the accumulation layer is as follows: mining under the slope-bending of overburden rock-toppling deformation of side rock-stress concentration of underlying rock-pulling and cracking; ② The cracks in the accumulation layer are distributed near the end of the working face of the goaf in the uphill direction, and are approximately parallel on the plane, showing a zigzagging motion or serrated shape. The number of ground fissures is more than that of surface fissures, but the scale is smaller. The temple buildings are affected by the hidden tensile ground fissures, which cause the deformation of the foundation and cause the cracking of the above-ground structure. During the monitoring period after stopping mining, the deformation rate of the accumulation body tends to converge, the residual deformation is reduced, and the deformation movement is basically stable. ③ After complete mining, the accumulation layer shows tensile deformation dominated by the following dislocations, and shear strain appears. The deformation degree of the accumulation layer will be aggravated under continuous mining conditions. The maximum principal stress increment of the underlying bedrock is 1 080.75 %, and the tensile stress is concentrated. ④ Short-wall room mining leaving section coal pillar is beneficial to reduce the deformation of accumulation layer. The research conclusions provide a reference for understanding the deformation and failure of the overlying accumulation layer on the slope disturbed by underground resource mining and seeking solutions for the protection of cultural relics in coal mining under ancient buildings.

**Key words:** coal resources under buildings; goaf; bedding slope; accumulation layer; deformation monitoring

## 0 引言

山西地处黄河中游、黄土高原东部,山地丘陵地貌发育。作为中华文明重要发祥地之一,山西省内文物古迹繁多:现有不可移动文物 53 875 处,全国重点文物保护单位 531 处,省级文物保护单位 779 处,文物单位保护数量位列国内之首<sup>[1]</sup>。同时,山西省内煤炭资源储量巨大,含煤面积占全省面积 40%,占全国煤炭总储量 20%,采煤活动频繁。据不完全统计,山西境内因地下开采带来的链生地表变形破坏,约造成各大矿区及所在地 5 693 间房屋严重受损,6 520.1 hm<sup>2</sup> 耕地受到不同程度的影响<sup>[2]</sup>。在这样的现实背景下,如何在地形起伏多变的山西矿区协调地下资源开采与地上文物古建筑保护,分析预测开采对地表斜坡的影响进而合理防控的现实需求显得尤为迫切。

围绕采空沉陷致地表斜坡变形破坏这一课题,国内外学者进行了大量卓有成果的研究:以斜坡岩土介质划分,可归结为关于岩质与土质盖层(下伏基岩)采动斜坡的研究:李滨等<sup>[3]</sup>以 FLAC<sup>3D</sup> 模拟分析重庆鸡冠岭采空诱发岩质滑坡,认为其属于层状岩体倾倒-滑移失稳复合破坏模式;MA 等<sup>[4]</sup>探讨了厚层黄土覆盖矿区地下采矿对地表沉陷与滑坡的影响特征,发现地表变形区域空间展布与采矿方向一致,并模拟分析了“采空沉陷—滑坡发生”灾害链形成过程。以斜坡结构划分,可归结为反倾与顺层采动斜坡的研究:崔杰等<sup>[5]</sup>、赵建军等<sup>[6-8]</sup>基于地球物理探测、地质过程机制分析及数值模拟方法,先后探讨了反倾层状采动斜坡地裂缝与岩体变形破坏演化伴生关系以及煤层深厚比、开采顺序等开采特征对斜坡

坡脚、临空面等关键位置的影响机理;TANG 等<sup>[9]</sup>建立预测模型分析采动影响下具软弱结构面的缓倾顺层岩质斜坡应力特征并预测其断裂破坏位置,预测结果在假设条件下与物理模拟试验结果吻合较好;代张音等<sup>[10-13]</sup>针对采空区顺层岩质斜坡的变形破裂特征与形成机制问题,基于相似材料模型试验与数值模拟,对不同开采顺序与煤柱留设方式下的顺层岩质斜坡的变形破裂响应特征进行了研究,得到了诸多有价值的分析结果。以斜坡岩性组合特征划分,可归结为上硬下软与软硬互层采动斜坡研究:王玉川等<sup>[14]</sup>研究贵州马达岭滑坡形成机制,指出软岩塑性变形与地下采空造成坡体后缘拉裂;SALMI 等<sup>[15]</sup>、DO 等<sup>[16]</sup>、ŚCIGAŁA R 等<sup>[17]</sup>先后通过非连续 DDA 数值模拟对上硬下软斜坡受地下采空诱发崩滑的形成机制进行了较深入的研究。这些研究深化了人们对采动斜坡变形破坏机理的认识。

不同地质环境、工程地质及采矿条件下的采动斜坡研究呈现一定的区域特征:崔鹏等<sup>[18]</sup>对多层采矿岩溶坡体进行了研究,龙建辉等<sup>[19-21]</sup>研究了黄土区采动斜坡触发机制。山西省采动斜坡的变形研究体现出山区文物古建筑压煤与缓倾顺层斜坡下伏煤层开采矛盾现实。当前少有对斜坡上覆堆积层的稳定性与变形机理的探讨,研究对象多为岩质或土质盖层斜坡,研究手段以数值模拟或物理模型为主。

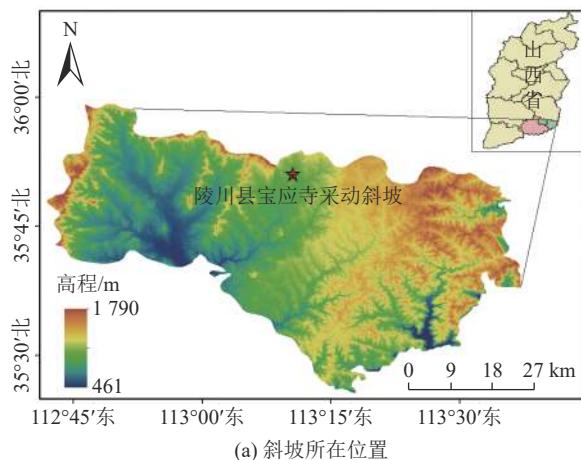
笔者以山西陵川县宝应寺采动堆积层为例,基于现场动态监测与地质过程机制分析,并结合数值模拟,探究采动影响下缓倾顺层斜坡上覆堆积层的稳定性与变形机理,对于正确认识采动影响下斜坡上覆堆积层地质过程机制具有重要意义。可为类似

斜坡体上文物古建筑的安全防护与地下资源的合理开采提供借鉴和指导。

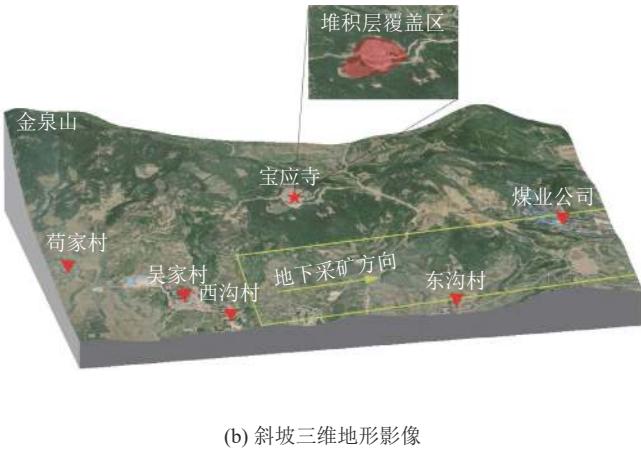
## 1 研究区概况

研究区位于山西省晋城市陵川县礼仪镇(图1a),地表基岩广泛出露,局部地区裸露,可见砂岩强风化~全风化后呈砂状,矿区内地沟发育中等,沟谷多

呈“V”或“U”字形,总体地势为西北高东南低。区内赋存有奥陶系、石炭系、二叠系、古近系及第四系地层。其中石炭系上统太原组含煤8层,15号煤层平均厚4.43 m,全区稳定可采;二叠系下统山西组含煤3层,3号煤层平均厚4.51 m,全区稳定可采。第四系地层以砂土、黏土和砂砾石层为主,地层平均厚度15 m。



(a) 斜坡所在位置



(b) 斜坡三维地形影像

图1 山西省陵川县宝应寺斜坡

Fig.1 Slope of Baoying Temple, Lingchuan County, Shanxi Province, China

研究区大地构造位置处在华北断块区吕梁—太行断块次级构造单元晋城—获鹿褶皱带的东部边缘,该褶皱带走向北 $23^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 东,线状延伸,由断裂和与之平行的褶皱组成。区内发育向斜褶曲构造一个,两翼地层基本对称,地层倾角 $3^{\circ}\sim 4^{\circ}$ 。

### 1.1 斜坡工程地质条件

斜坡位于关岭山山脊南端,属中低山区侵蚀地貌,微地貌发育(图1b)。斜坡地表呈“上缓下陡”趋势,坡向 $222^{\circ}$ ,平均坡度超过 $30^{\circ}$ ,岩层倾角 $5^{\circ}\sim 7^{\circ}$ ,为缓倾斜顺层斜坡。坡体地层构成具软硬岩二元互层特征。坡顶主要覆盖第四系卵石层(堆积层),下伏二叠系砂岩/泥岩互层地层、煤层及石炭系灰岩。坡体上部地层风化节理发育(强风化带);中下部地层呈中风化,节理裂隙一般发育;下伏煤层与基岩呈弱风化。3号煤层顶底板均为泥岩;15号煤层顶板为灰岩,底板为泥岩。

斜坡上部第四系地层存在2级先前为建造宝应寺而削坡形成的平台:一级平台为宝应寺观心塔所在区,地表出露松散破碎的强风化砂岩;二级平台呈圈椅状,为寺院建筑群所在区,平台后缘存在大量块状砂岩堆积物。第四系松散孔隙水含水层为夹砂砾的砂质黏土,主要接受大气降水补给与第四系侧

向补给;二叠系碎屑岩裂隙水含水层为砂岩层。受层间隔水泥岩层影响,坡内含水层垂向上水力联系微弱。勘察场区内发育一组平行节理,倾向 $150^{\circ}\sim 161^{\circ}$ ,倾角约 $68^{\circ}$ 。未见断层。宝应寺斜坡典型工程地质剖面如图2所示。

### 1.2 采矿活动

根据政府部门于2013年底为山西陵川崇安关岭山煤业有限公司换发的最新煤炭生产许可证,最先开采煤层为石炭系上统太原组15号煤层。开采设计方案将15号煤层划分为6个盘区,首先开采第2个盘区,该盘区工作面由南向北布置,依次为15203、15204、15205、15206、15207工作面。目前前3个工作面已经回采,正在15206工作面上进行开采。15206工作面宽111 m,为走向长壁式开采,工作面已在开采方向上推进数百米(图3)。15206工作面地面平均高程1166 m,煤层底板平均高程997 m,平均采深168 m,煤层倾角为 $6^{\circ}$ 。2018年8月,因地下开采作业造成斜坡上覆堆积层持续变形导致宝应寺建筑群开裂受损,15206工作面停采(截至停采时15206工作面回采区如图3中黄色区域所示)。

### 1.3 堆积层变形过程

坐落于斜坡堆积层之上的宝应寺始建于汉唐,

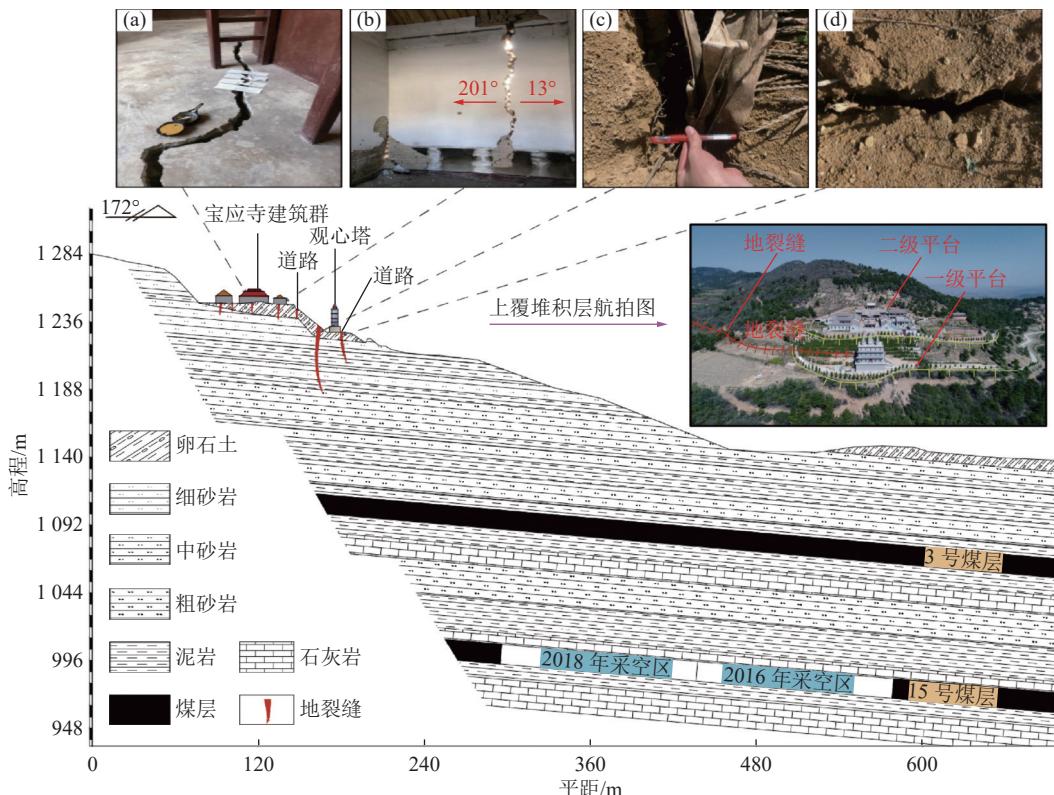


图2 宝应寺斜坡典型工程地质剖面

Fig.2 Typical engineering geological section of Baoyingsi slope

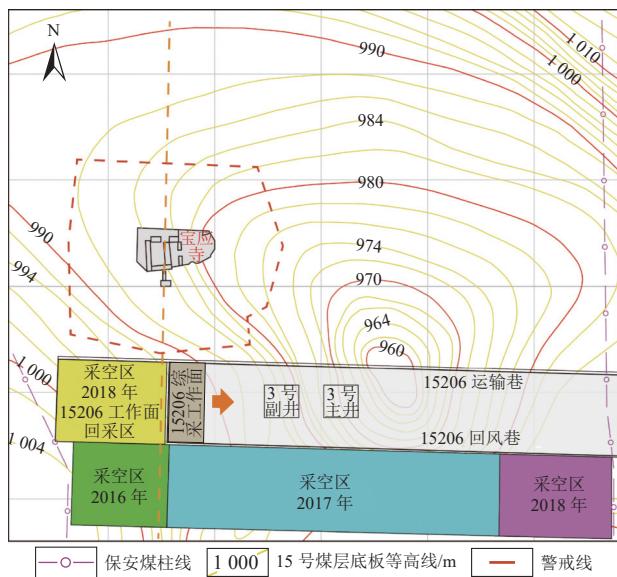


图3 采空区及采煤工作面相对位置

Fig.3 Relative position of air-sea zone and the coal mining face

大兴于元明，属晋城市重点文物保护单位，寺院位于关岭山煤业公司采煤规划中二盘区开采工作面的北部。2018年3月二盘区15206井采工作面推进过程中，堆积层地表陆续出现多条大小不一的地裂缝：其中一级平台观心塔靠北侧地表出现1条近东西走向呈南北拉裂的地裂缝；寺院建筑群所在二级平台地

表出现多条小型裂缝，建筑物墙体出现开裂征兆。

2018年8月，堆积层地表变形愈发剧烈引起了更广泛的影响：一级平台地裂缝进一步拉张、沿走向延伸，长度达20m，宽约3cm，地表向西南下错1.5cm，垂向上呈明显上宽下窄“V”型尖灭；一、二级平台前缘道路路面出现呈近东西拉裂，南北延伸的裂缝，且二级平台道路裂缝更多；二级平台建筑物地面与墙体发育多条近东西开裂的裂缝（图2a、图2b），地面朝南向或西南向下错，下错方向总体指向采空方位，最大下错量3cm。总体上裂缝平面展布近似平行，均呈陡倾，裂缝以倾向南—南西—西产状为主（图4）。地物裂缝较之地表裂缝数量更多，密度更大。

## 2 堆积层变形动态监测

为掌握停采后堆积层地表变形程度与趋势，对其稳定性和寺院建筑安全防护进行合理研判与指导，开展了堆积层地表变形监测工作。

### 2.1 变形监测方案

针对场区地质条件、堆积层变形特征与地物变形现状，将监测点布设在容易发生破坏的地表部位：沿堆积层两级平台的道路与一级平台后缘地裂缝方向上，由北至南布设A(A1—A15)、B(B1—B15)、C(C1—C7)共3条监测线（图5），总计37个监测点，

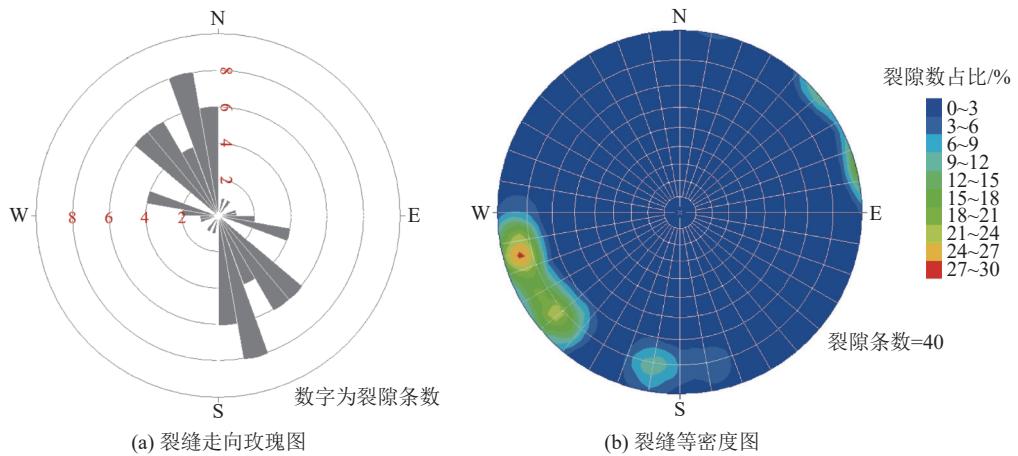


图4 裂缝产状玫瑰图与等密度图

Fig.4 Rose diagram of crack production with isodensity map

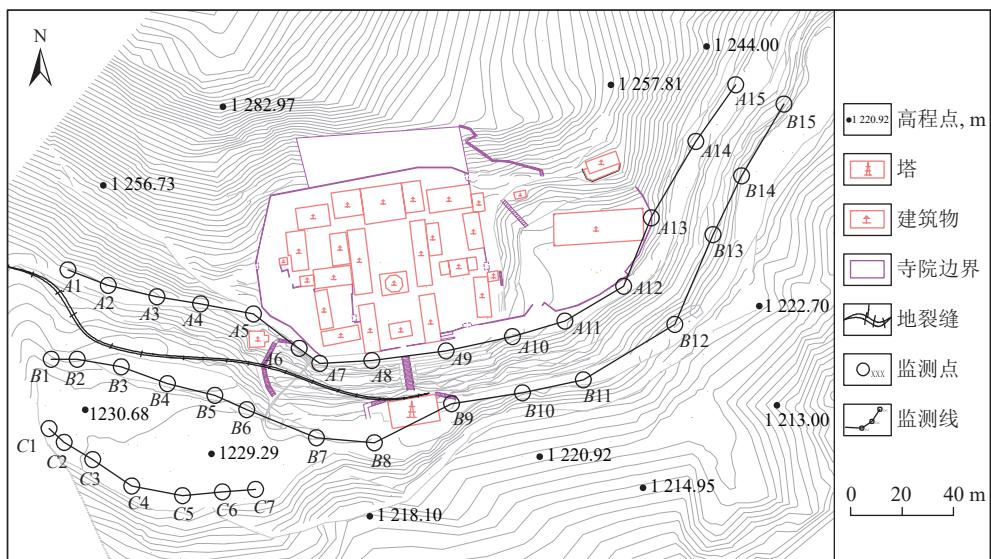


图5 变形监测工程平面布置

Fig.5 Layout plan of deformation monitoring project

通过水准测量与GPS测量对地表进行水平与垂直位移监测。基于堆积层变形破坏特征与趋势及宝应寺建筑物开裂现状,为更高效地获取供分析研判的有效地表变形数据,采取为期2个月的短监测周期(监测分两期,中间有间隔天。具体监测周期与监测频次视实际变形情况弹性调整)。

## 2.2 变形监测结果分析

基于堆积层地表各监测线所得监测原始数据,通过进一步的整理与计算,绘制得到了反映累积变形量与变形速率的曲线图。本节将立足图表所反映出的堆积层变形特征与趋势展开分析。

### 2.2.1 水平位移与垂向变形分析

地表各监测点累计水平变形量与累计垂向变形量如图6a、图6b所示。地表水平变形在A测线上A1—A3及A7—A9区域较集中明显。A测线平均变

形量9.2 mm,最大变形量22.5 mm,出现在A7位置;在B测线上地表水平变形在B2—B6区域较集中,在B9、B10及B14、B15区域存在局部明显变形。B测线平均变形量9.3 mm,最大变形量34.5 mm,出现在B2位置,亦是3条测线中变形最大值点;C测线上地表水平变形则在C2及C4—C7区域较明显。C测线平均变形量11.1 mm,最大变形量16.0 mm,出现在C2位置。总体上监测表明水平变形主要发生在宝应寺西南侧,大致是现场调查查明的一级平台后缘最大地表裂缝走向上的两侧区域,同时这一总体变形方向在平面上基本指向采空区方向。监测线B与监测线C上的地表垂向变形,较之于监测线A表现更为强烈,最大垂向变形值出现在B8。测线A的下沉变形集中在A11—A14区域,平均下沉值13.8 mm,最大下沉值16 mm;测线B的下沉变形几

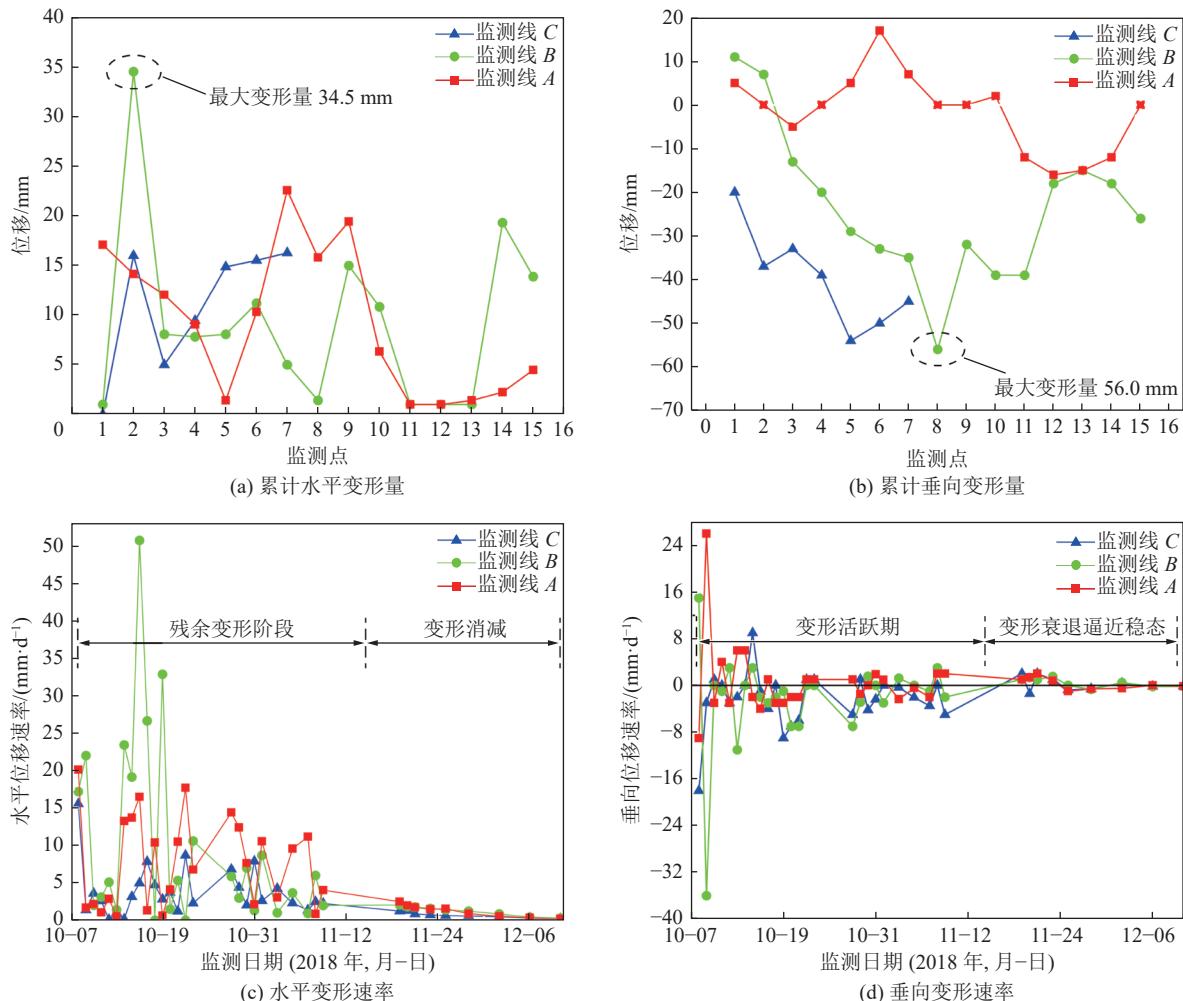


图 6 变形监测成果

Fig.6 Deformation monitoring results

乎在整条测线上均有发生,且变形高值主要集中于B5—B11区域,平均下沉值30.0 mm,最大下沉值出现在B8位置,为56.0 mm;测线C整条测线下沉变形特征表现最甚,平均下沉值39.7 mm,最大下沉值出现在C5位置,为54.0 mm。此外,受堆积层一二级平台形变速率差异及局部地形控制,测线A与测线B部分测点区域存在小范围隆起变形特征。总体上,堆积层一级平台较二级平台前缘垂向变形强烈,且表明变形主要发生在宝应寺南侧至西南侧,平面上方位指向了采空区。

## 2.2.2 堆积层稳定性评价与预测

根据各监测线形变最大点的水平与垂向变形速率图(图6b、图6d),水平与垂向变形速率均在2018-10-07—2018-11-12监测期内表现出明显的起伏波动特征,反映堆积层尚处于变形释能与应力调整的不稳定状态;而后至2018年12月10日监测结束的时段内,水平变形速率逐渐降至0.18~0.32 mm/d,垂向变形速率降至0.12~0.18 mm/d,变形速率曲线

表现出逐渐趋于收敛平稳的特征,反映堆积层残余变形消减,地表变形移动已进入衰退逼近稳定状态。总体上,水平与垂向变形速率数值上由大转小,曲线特征由起伏跌宕转为平稳收敛。到地表变形监测结束时刻,地表水平/垂向变形速率已由最初极大衰减,对照《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范》<sup>[22]</sup>(以下简称“三下采煤规程”)基本要求可得:自2018年8月15206工作面停采后,至同年12月中旬,受采空区影响的堆积层已由变形移动转为基本稳定,堆积层变形与开采活动呈现时间关联性。综上,预测若15206工作面继续持续性开采将造成堆积层变形加剧。

## 3 堆积层变形破坏分析

### 3.1 采空区对斜坡的影响

地下采矿形成采空区后,岩体向采空区方向卸荷变形,造成拉裂、破裂、滑移破坏现象,其破坏规模和程度主要受地质环境及开采方式的影响<sup>[7]</sup>。

堆积层所在斜坡属于缓倾顺层软硬岩二元互层结构,受重力驱使,力学强度相对较弱的软岩产生塑性变形,斜坡趋于向临空方向移动,拉应力松弛区出现在坡顶。地下采矿形成采空区打破了斜坡原始应力平衡,应力状态改变并通过坡体变形再次达成新平衡,变形进程导致坡体岩层工程地质条件改变、软弱层力学强度降低,而坡体岩层向采空区的移动变形进一步使坡顶拉应力增大并出现应力集中,张性裂缝因此孕生。相同地质环境和采矿条件下,逆坡开采形成的采空区造成斜坡变形破裂影响最严重,更易诱发坡体破坏失稳,此外在缓倾煤层中采取走向长壁式开采会形成大面积采空区,亦不利于斜坡稳定<sup>[18-19]</sup>。宝应寺斜坡15号煤层属于逆坡长壁式开采,仅保留采空区两端边界煤柱,从斜坡结构与岩性组合特征而言,此种采矿方式势必对斜坡稳定性造成影响,进而影响到堆积层稳定性,对其上宝应寺建筑物的安全防护构成直接威胁。

综上,软硬互层缓倾顺层斜坡下伏煤层逆坡开采对斜坡的影响可归结为以下3方面:①改变覆岩原始应力应变状态,引起覆岩移动变形劣化岩层地力学特性,应力调整造成的破裂破坏了岩层的完整性;②覆岩向采空区卸荷变形、弯张下沉,引起两侧岩层朝向采空区移动变形,硬岩受拉开裂软岩受压碎裂,于坡顶引发拉裂缝,坡脚出现剪应力集中;③坡顶裂缝在持续采动影响下可能向深部发展,达到潜在剪切弱面引起剪应力集中,成为降雨入渗坡体劣化剪切面抗剪强度的通道,促进坡体蠕滑变形,削弱斜坡整体稳定性。

### 3.2 地裂缝形成机制

堆积层现场调查共查明60余条地物裂缝、10余条道路裂缝及多条地裂缝,裂缝在平面上多呈“之”字或锯齿状,越靠近二级平台边缘,拉张裂缝越发育,最大拉裂宽度达5.1 cm并多伴有朝向采空方位的下错现象,反映出地下采空与堆积层裂缝的关联性。地下采空引起的上覆岩层移动变形是一个复杂的动态过程,受到覆岩岩性、覆岩产状、采煤厚度、采煤深度、采煤方式等诸因素的影响,但在采空区顶部及侧边界出现规律性、对称性的拉应力、压应力及剪应力分布区,随采空区的扩大应力区亦将动态变化,形成不同移动变形状态<sup>[20]</sup>与力学模式的覆岩变形区(图7):位于直接顶至覆岩中部的A区,岩层受顶板拉应力、自重及上覆岩层重力作用,表现出垂向弯曲与水平拉张变形特征;位于覆岩中部至地表的B区受下伏岩层卸荷弯张控制,在重力驱动下向下拉伸,

而水平方向受两侧岩层相向挤压呈现出水平压缩变形特征;C区位于地表移动边界线与垂向弯张边界线之间,受侧向压力减小控制,在重力驱动下表现出指向采空区的倾倒式变形,几何形态呈下窄上宽<sup>[19]</sup>,变形进一步强化了坡体内的拉应力状态;D区处于采动影响范围之外,采动变形微弱。这种由应力调整引起的覆岩拉伸压缩变形,必然直接导致岩层的松动、破裂,衍生出大幅削弱岩体完整性的裂隙。堆积层地表裂缝形成正是受变形模式表现为拉伸—倾倒的C区拉应力控制。

首先,15号煤层15206工作面推进过程中采动覆岩发生垂向下沉弯曲,岩层的非均质性与各向异性让其实际的变形并不连续、均匀,由此造成了层间错动分离。同时软硬岩互层结构中抗压与抗拉强度较小的泥岩与3号煤层,在A、B区垂向拉张带与C区垂向挤压带中受拉伸与压缩应力控制首先产生较大型塑性变形乃至碎裂,进一步促进了覆岩的下沉弯曲与层间错动。

其次,采动覆岩下沉弯曲伴随着覆岩的水平变形。B区垂向拉张水平挤压带的覆岩水平变形指向采空区,而其下部A区垂向拉张水平拉张带覆岩水平变形指向采空区侧端的支撑应力区,覆岩内部普遍受到附加剪应力作用,并在上述两变形带分界处与采空区边界剪应力集中。同时,位于采空区边界之外的两侧C区覆岩内部的大主应力场由重力主导转化为由拉应力主导,覆岩水平变形指向下沉弯曲带和采空方位,而覆岩中软弱岩层本身较弱的地力学强度特性,致使其在不同变形带中均产生一定的塑性变形量,从而在以拉应力主导的C区垂向挤压水平拉张变形带内使硬岩向着临空方向位移,既有风化裂隙因此扩张,松散的黏结强度更弱的堆积层便在这种下伏岩层的位移形变进程中受到牵动(图7),产生具有指向采空方位下错特征的拉张裂缝。

### 4 数值模拟

为进一步探究采动影响下覆岩与堆积层位移场、应力场及应变分布特征,明晰堆积层变形破坏机理,同时探讨开采方式对斜坡堆积层变形的影响,使用大型岩土有限元分析软件Midas GTS NX<sup>[23]</sup>基于平面应变理论建立二维数值模型开展计算分析。模型岩土体材料按均质弹塑性考虑,屈服准则采用岩土数值分析中运用成熟的Mohr-Coulomb强度准则,为简化地应力,以初始平衡自重应力作为初始应力。岩土体物理力学参数依据勘探钻孔与室内土工试验,

并考虑类似工程经验选取,见表1。数值模型设定了逆坡向的2016年(开采1)与2018年(开采2)2步采煤顺序,旨在对比分析15206采煤工作面继续推进走向穿越宝应寺斜坡脚前后对堆积层造成的影响。

#### 4.1 位移分析

模拟结果(图8)表明地下煤层采掘后,采空区端部煤壁与采空区顶板附近出现了截然相反的位移特

征:前者产生向采空区中心的相向发展的X向位移,表现为压性鼓胀挤出变形特征;后者则产生背离采空区中心的相离发展的水平位移,表现为张性拉伸变形特征。顶板覆岩中部至地表范围内的岩层水平位移又再次表现为朝向采空区中轴线的相向运动特征,表明采空区形成后顶板附近覆岩发生相离移动下的拉张变形,顶板中上部覆岩发生相向移动下的

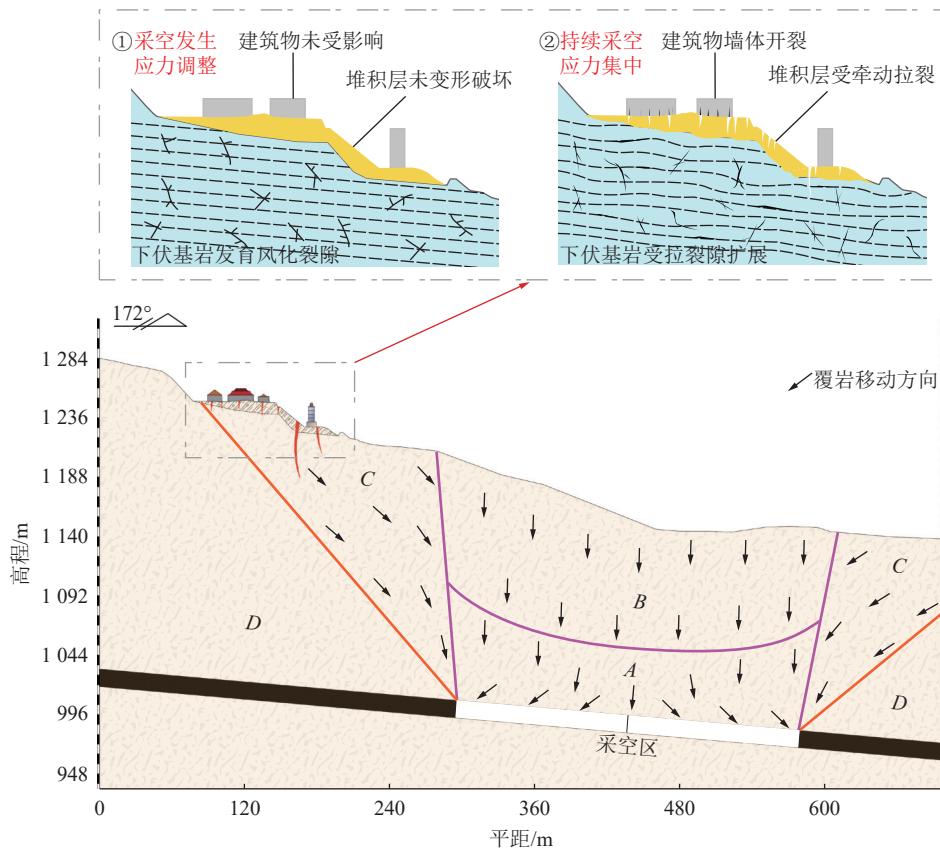


图7 覆岩变形分区与堆积层变形拉裂  
Fig.7 Overburden rock deformation zoning and accumulation layer deformation tensile crack generalization

表1 岩层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of the rock formation

岩类	容重 $\gamma$ / $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\mu$	黏聚力 $C/\text{kPa}$	内摩擦角 $\phi/(\text{°})$	抗拉强度 $R_m/\text{MPa}$
堆积层	17.2	7	0.44	32	25	0.28
强风化带	16.3	993	0.18	950	31	1.98
细砂岩	25.9	32 910	0.24	7 200	42	2.41
中砂岩	28.3	36 100	0.27	12 110	39	2.68
粗砂岩	29.8	33 850	0.21	11 590	41	2.96
泥岩	25.3	35 200	0.36	1 200	40	2.02
煤层	17.2	5 300	0.32	800	30	1.03
石灰岩	28.7	23 500	0.20	15 000	36	4.27

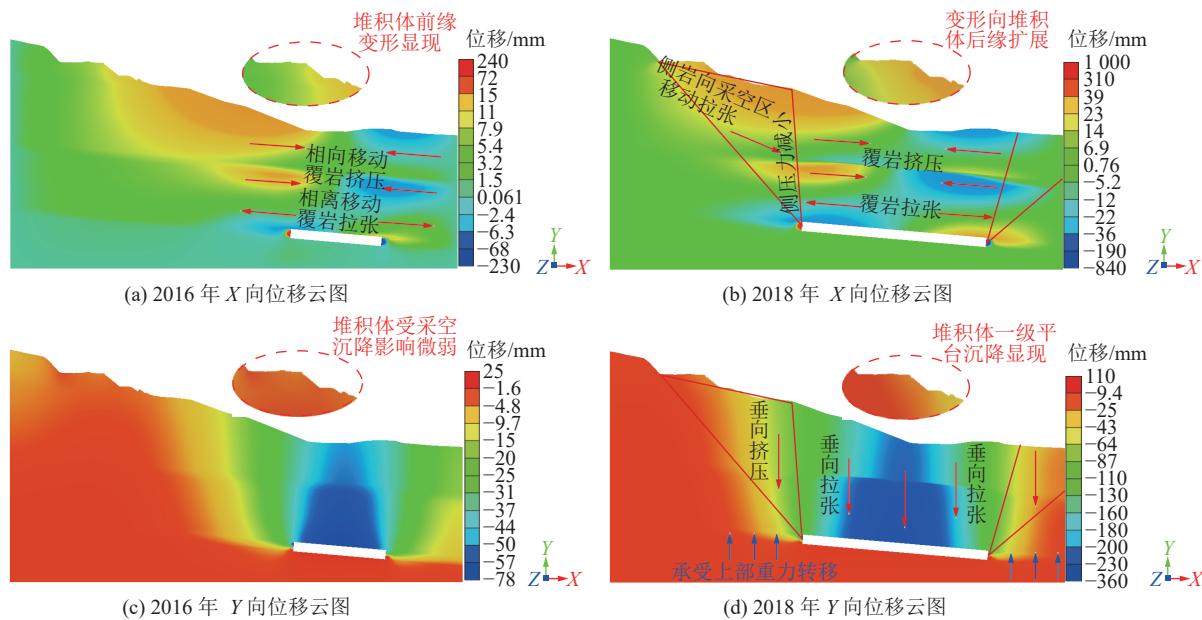


图 8 不同开采阶段坡体位移云图

Fig.8 Slope displacement cloud diagram in different mining stages

挤压变形,而采空边界之外的两侧岩层因这种相向移动挤压引起侧向压力减小,在重力驱动下,在采空造成压应力、拉应力转变进程中发生朝向采空方位的倾倒变形。由此在顶板覆岩中上部形成岩层水平压缩区,而在采空边界外形成岩层水平拉伸区,斜坡上覆堆积层即处在此影响之中。上述覆岩位移特征也印证了前述将堆积层划归在按力学模式区分形成的C区垂向挤压水平拉张变形带内的合理性与正确性。

Y向位移受重力与采空区控制,采空区的形成造成顶板岩层失去支撑进而重力发生转移,在顶板位置产生显著竖向下沉变形,且变形以顶板沉降中心轴线为对称线,向采空边界及外侧山体以递减趋势辐射扩散。因此顶板之上的岩层质点位移等值拱离地表越近拱径越大,至地表呈发散状。

随采煤工作面的推进,采出空间不断扩大,覆岩应力调整区进一步扩大,变形范围与变形量亦随之扩大。2018年完全采空前后,斜坡堆积层一、二级平台地表X向位移增长率分别达288%、296%;Y向位移增长率分别高达838%、512%。

#### 4.2 应力分析

地下采煤形成的采出空间直接导致斜坡内部的原始应力发生重新调整与集中:坡体中上部岩层应力状态主要以拉应力为主,而坡体下部岩层受重力控制应力状态表现为受压。除斜坡坡脚存在局部压应力外,斜坡地表均由压应力转为拉应力而处在受拉状态(表2),因而地质力学特性不良的堆积层便会在拉应力超过其抗拉强度极限时产生拉张裂缝。

表2 完全采空前后堆积层及下伏基岩最大主应力值对比

Table 2 Comparison of maximum principal stress values in accumulation layer and underlying bedrock before and after complete emptying

位置	最大主应力/kPa		增长率/%
	采空前	采空后	
一级平台	-18.08	92.14	609.62
二级平台	-14.95	204.78	1 469.77
两级平台间坡面	-47.29	186.34	494.04
下伏基岩	-374.27	3 670.67	1 080.75

值得注意的是堆积层下伏基岩受软硬互层岩性与风化裂隙影响,在采动条件下出现了拉应力集中现象,弹性变形逐渐转为塑性变形,裂缝扩展、软岩压缩向采空区挤出,于是堆积层受到下伏岩层发生的指向采空区变形的牵动,变形被放大,裂缝进一步加宽下错—引起堆积层平台之上的宝应寺建筑物开裂破损。

采空区顶板出现拉应力集中并与两侧覆岩中部局部拉应力集中区贯通,当拉应力超过顶板覆岩极限抗拉强度时采空区直接顶将发生垮落破坏。而采空区端部岩层受周围岩体的挤压作用比较明显,存在压应力集中,将造成功学强度较弱的煤壁发生朝向采空区临空区的片帮(侧向挤出破坏)。最大拉应力出现在顶板中心部位,最大压应力则出现在采空区端部附近。直接顶坡体中上部岩层表现出的“拉应力为主,局部存在压应力”的特征(图9a)是由于顶板覆岩弯张下沉,引起了A、B变形区与C变形区交界部位岩土体侧压力作用大幅减弱,从而导致岩层

应力状态由压应力快速向拉应力转变。

采空区端部附近出现呈蝴蝶状的关于垂直顶板的轴线对称的剪应力集中区(图9b),同时顶板亦出现剪应力集中现象。较之于顶板灰岩岩层的地质力学特性,采空区端部煤层的抗剪强度更低,在应力集中状态下很容易发生剪切破碎。2018年完全采空后导致坡体剪应力分布发生显著调整:坡脚产生剪应力集中,但堆积层内部未出现剪应力集中,受剪应力影响微弱,其变形破坏受采动引起的拉应力控制。

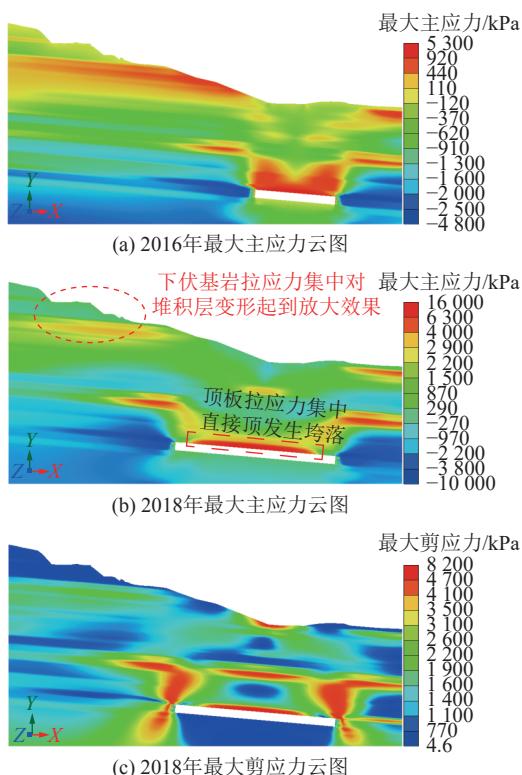


图9 不同开采阶段坡体应力云图

Fig.9 Slope stress cloud diagram in different mining stages

#### 4.3 应变分析

图10为最大剪应变云图。最大剪应变模拟结果显示:采空区端部存在明显剪应变集中现象,采空区的形成并未在坡体内造成贯通性的或者较明显的剪应变区,这说明采空区顶板岩层尚未出现大范围且强烈的冒落现象,没有进一步引起其上覆岩强烈变形破坏产生显著竖向裂隙与离层裂隙,从而在含软岩夹层的坡体内部链生出剪切变形贯通区。受采动应力与重力控制,顶板覆岩中部3号煤层部位存在沿层理分布的剪应变区,结合前述坡脚剪应力集中的特征:这一方面印证了采空区形成引起的覆岩弯曲下沉,另一方面反映出斜坡岩层受采空下沉影响产生向临空方向的运动。堆积层一级平台后缘至二级平台前缘剪应变显现,这与“二级平台前缘路面

裂缝较多;一级平台后缘出现呈南北拉裂地裂缝”的现场调查事实较吻合。堆积层下伏基岩内未出现明显剪应变增高带,表明采动拉应力作用下堆积层较之于其下伏基岩由弹性变形先达塑性变形状态,基岩的拉伸变形对上覆力学强度更低的堆积层变形具有牵动放大效应。

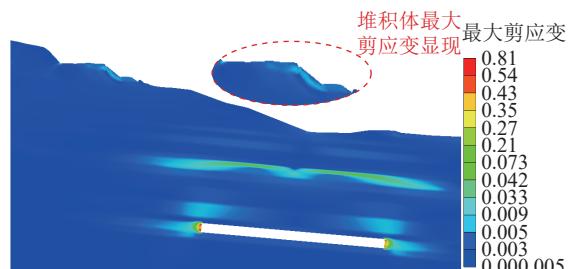


图10 最大剪应变云图

Fig.10 Maximum shear strain cloud

综上,采空区的形成不足以造成覆岩发生整体性滑裂破坏,只能引起有限的直接顶冒落、端部煤壁片帮及局部覆岩剪切变形破裂,但对于上覆地质力学强度较低的堆积层的变形破坏产生了放大效果:下伏形变风化基岩拉应力集中造成堆积层地表拉裂,剪应变显现,其整体性遭到一定程度的破坏。在持续性地下开采作用下堆积层地裂缝将进一步发育,变形程度将更加剧烈,稳定性将大幅下降。这与前述基于动态监测成果的分析结论是较吻合的。

#### 4.4 开采方式优化

山区坡下采煤,优化采空区布置、避免深厚比急剧减小、减小采空区工作面长度对减弱斜坡变形具有重要作用。煤炭资源开采实践表明,合理留设切眼巷道煤柱,有利于支撑地层,稳定采空区域。此外有关学者通过底摩擦物理模型试验研究指出矿柱的留设及其位置会对斜坡变形特征与稳定性产生重要影响<sup>[7]</sup>。

若将采空区实际情况下的边界煤柱布局改换为区段煤柱布局,亦即将长壁式开采方式以短壁式开采替代之,数值模拟结果显示这将有利于降低采空引起的覆岩变形程度(图11),斜坡上覆堆积层的水平与竖向位移因此得到有效控制。短壁开采中切眼巷道区段煤柱留设按“三下采煤规程”巷道护巷煤柱设计计算式确定:

$$S = \sqrt{\frac{H(2.5 + 0.6M)}{f}} \quad (1)$$

$$f = 0.1 \sqrt{10R_c} \quad (2)$$

式中:  $S$  为巷道护巷煤柱水平宽度,  $m$ ;  $H$  为巷道最大

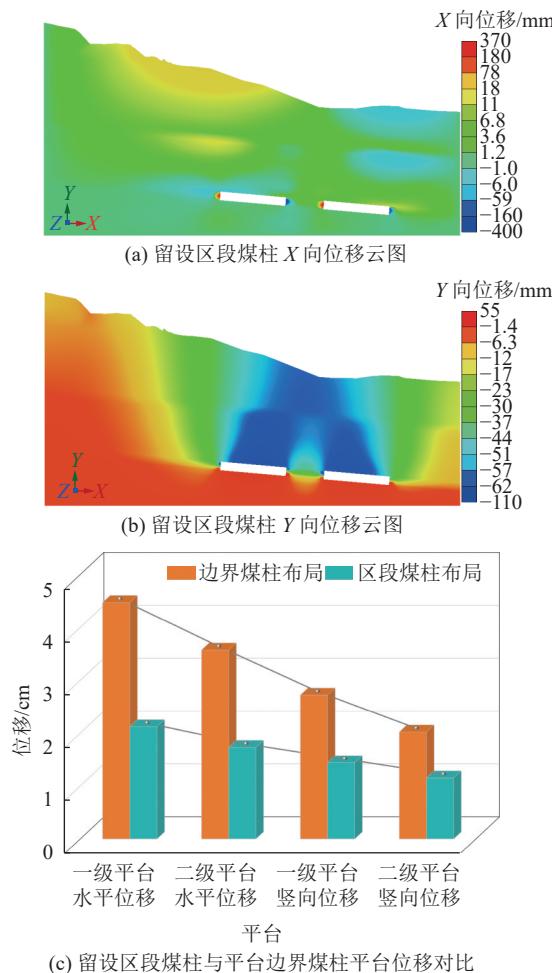


图 11 采煤方式优化

Fig.11 Coal mining method optimization

垂深, m;  $M$  为煤厚(取最大厚度), m;  $f$  为煤的强度系数;  $R_c$  为煤的单轴抗压强度, MPa。计算得区段煤柱宽度为 41.4 m, 取 45 m。

区段煤柱条件下, 堆积层一、二级平台的水平位移分别减小 53%、52%; 坚向位移分别减小 48%、43%。赵建军等<sup>[5]</sup>通过 PFC 离散元数值模拟探析了采空区参数对缓倾斜顺层斜坡变形特征的影响, 指出通过控制采空区工作面长度以增大采空区深厚比, 或避免采空区跨越坡脚, 都有利于减轻采空下沉效应对坡体的影响。如此, 可使上覆堆积层的变形得到有力控制, 最大限度降低地下采矿活动对坐落于堆积层上文物古建筑安全防护的不利影响。

## 5 结 论

1)长壁式地下开采是引起堆积层变形的诱因, 堆积层软弱特性与斜坡软硬互层结构是其变形内因。采空引起覆岩卸荷弯张下沉, 两侧岩层侧压减小产生指向采空区的倾倒变形; 堆积层下伏基岩拉应力集中, 硬岩受拉软岩压缩, 其变形模式为垂向挤压水

平拉张。堆积层受下伏形变基岩牵动, 变形被放大, 产生张性地裂缝, 其变形机制为: 坡下采空—覆岩卸荷弯曲—侧岩倾倒变形—下伏岩层应力集中—牵动拉裂。

2)堆积层裂缝分布在上坡方向采空区工作面端部附近, 平面上展布方向近一致, 近似平行, 呈“之”字或锯齿状。地物裂缝较之地表裂缝数量更多、密度更大, 但规模更小, 反映寺院建筑群受隐伏张性地裂缝影响致地基形变造成地面以上结构开裂。越靠近堆积层前缘, 地裂缝变形程度越剧烈, 垂向上呈明显上宽下窄“V”型尖灭; 监测期内, 堆积层地表水平与垂向变形速率由大转小, 速率曲线由起伏跌宕逐渐转为平稳收敛, 残余变形消减, 变形衰退逼近稳定态, 表明停采后堆积层已由变形移动转为基本稳定。

3)数值模拟显示完全采空后, 堆积层垂向位移增长率较之水平位移更甚, 表现为以下错为主的拉张变形, 其下伏基岩最大主应力增量达 1 080.75%, 拉应力集中。覆岩中未见剪应变贯通区, 采空影响下尚未引起覆岩强烈变形并产生显著竖向裂隙与离层裂隙。堆积层表现出明显剪应变集中特征, 完全开采条件下堆积层变形程度将加剧。

4)留设区段式煤柱较之边界式煤柱更能减轻采空影响下的堆积层变形, 因而采矿方式上采取短壁房式开采更为合理。日后为减少此类地下资源开采活动对周边文物古建筑造成永久性破損事件的发生, 还应合理设计采矿工作面尽可能避免穿越坡脚并控制工作面长度, 同时强化顶板管理必要时进行永久支护。

## 参考文献(References):

- [1] 徐秀丽. 牢记嘱托浓墨重彩书写山西文物事业发展新篇章 [N]. 中国文物报, 2022-03-25(001).
- [2] 周永昌, 杨义军. 山西地质灾害(1)[M]. 太原: 山西科学技术出版社, 2010: 228-236.
- [3] 李滨, 王国章, 冯振, 等. 地下采空诱发陡倾层状岩质斜坡失稳机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(6): 1148-1161.  
LI Bin, WANG Guozhang, FENG Zhen, et al. Failure mechanism of steeply inclined rock slopes induced by underground mining[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(6): 1148-1161.
- [4] MA S, QIU H, YANG D, et al. Surface multi-hazard effect of underground coal mining[J]. Landslides, 2023, 20(1): 39-52.
- [5] 崔杰, 王兰生, 王卫, 等. 采空区边坡变形破裂演化机制研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(4): 409-414.  
CUI Jie, WANG Lansheng, WANG Wei, et al. Deformation and fracturing mechanism of goaf slope[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2008, 25(4): 409-414.
- [6] 赵建军, 王子贤, 严浩元, 等. 缓倾层状结构高陡采动斜坡变形特

- 征研究[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(2): 174–183.
- ZHAO Jianjun, WANG Zixian, YAN Haoyuan, et al. Deformation characteristics of a high and steep mining slope with gently-inclined layered structure[J]. Hydrogeology Engineering Geology, 2022, 49(2): 174–183.
- [7] 赵建军, 肖建国, 向喜琼, 等. 缓倾煤层采空区滑坡形成机制数值模拟研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(3): 424–429.
- ZHAO Jianjun, XIAO Jianguo, XIANG Xiqiong, et al. Failure mechanism numerical simulation of mining landslide with gentle bedding coal strata[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(3): 424–429.
- [8] ZHAO J J, XIAO J G, LEE M L, et al. Discrete element modeling of a mining-induced rock slide[J]. SpringerPlus, 2016, 5( 1) : 1–19.
- [9] TANG J, DAI Z, WANG Y, et al. Fracture failure of consequent bedding rock slopes after underground mining in mountainous area[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52: 2853–2870.
- [10] 代张音, 唐建新, 舒国钧, 等. 地下采空诱发顺层岩质斜坡变形破坏特征研究[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(4): 1294–1298.
- DAI Zhangyin, TANG Jianxin, SHU Guojun, et al. Deformation and fracture response characteristics of the bedding rock slope under the impact of the goaf[J]. Journal of Safety and Environment, 2017, 17(4): 1294–1298.
- [11] 代张音, 刘庆, 王育林, 等. 基于离散元法的采动顺层岩质斜坡变形破坏响应特征研究[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(3): 1089–1098.
- DAI Zhangyin, LIU Qing, WANG Yulin, et al. Deformation and failure response of the bedding rock slope induced by the underground mining activities based on the distinctive element method[J]. Journal of Safety and Environment, 2021, 21( 3) : 1089–1098.
- [12] 代张音, 唐建新, 江君, 等. 地下采空诱发含软弱夹层顺层岩质斜坡变形破裂的相似模拟[J]. 煤炭学报, 2016, 41( 11) : 2714–2720.
- DAI Zhangyin, TANG Jianxin, JIANG Jun, et al. Similarity modeling on instability and failure of rock bedding slope with weak interlayer caused by underground mining[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(11): 2714–2720.
- [13] DAI Z, ZHANG L, WANG Y, et al. Deformation and failure response characteristics and stability analysis of bedding rock slope after underground adverse slope mining[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(6): 4405–4422.
- [14] 王玉川, 巨能攀, 赵建军, 等. 缓倾煤层采空区上覆山体滑坡形成机制分析[J]. 工程地质学报, 2013, 21(1): 61–68.
- WANG Yuchuan, JU Nengpan, ZHAO Jianjun, et al. Formation mechanism of landslide above the mined out area in gently inclined coal beds[J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(1): 61–68.
- [15] SALMI E F, NAZEM M, KARAKUS M. Numerical analysis of a large landslide induced by coal mining subsidence[J]. Engineering Geology, 2017, 217: 141–152.
- [16] DO T N, WU J H. Simulating a mining-triggered rock avalanche using DDA: A case study in Nattai North, Australia[J]. Engineering Geology, 2020, 264: 105386.
- [17] ŚCIGAŁA R, SZAFULERA K. Linear discontinuous deformations created on the surface as an effect of underground mining and local geological conditions-case study[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79(4): 2059–2068.
- [18] 崔芳鹏, 武强, 李滨等. 多层浅埋煤层开采触发岩溶坡体动力崩滑机制研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(2): 317–333.
- CUI Fangpeng, WU Qiang, LI Bin, et al. Dynamic formation mechanism of a karst landslide triggered by mining of multiple-layer & shallow-seated coal seams[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(2): 317–333.
- [19] 龙建辉, 朱清华, 倪向龙. 地下资源开采诱发的一种滑坡模式研究: 以采空触发滑坡为例[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(8): 181–187.
- LONG Jianhui, ZHU Qinghua, NI Xianglong. Study on landslide model induced by underground resource exploitation: -taking mining—triggered landslide as an example[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(8): 181–187.
- [20] 龙建辉, 张吉宁. 煤矿井巷上方大型老滑坡复活机理与致灾过程[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(3): 511–517.
- LONG Jianhui, ZHANG Jining. Revival mechanism and disaster-causing process of old-large landslide on coal mine tunnel[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2015, 32(3): 511–517.
- [21] 张吉宁, 龙建辉, 卫红学, 等. 采动影响区外缘上覆黄土滑坡形成立学机制[J]. 煤矿安全, 2015, 46(1): 37–39.
- ZHANG Jining, LONG Jianhui, WEI Hongxue, et al. Mechanical mechanism of overlying loess landslide formation at outer edge of mining impact zone[J]. Safety in Coal Mines, 2015, 46( 1) : 37–39.
- [22] 煤炭科学研究院. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范 [S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2018; 1–59.
- [23] 杨撷民, 霍俊杰, 李彦荣. 基于MIDAS软件对受采空区影响坡体的稳定性研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(8): 89–95.
- YANG Xiemin, HUO Junjie, LI Yanrong. Study on stability of slope affected by goaf based on MIDAS software[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(8): 89–95.